

双毛细管法高温气态环己烷黏度测量研究*

陈 强, 刘朝晖, 毕勤成, 程 想, 冯 松

(西安交通大学 能源与动力工程学院 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要: 为了探索双毛细管法在碳氢燃料高温气态黏度测量中的应用, 采用双毛细管法测量了亚临界压力下环己烷的高温气态黏度。测量温度为 301.9~567.1K (间隔约 10K); 压力为 0.5~4.0MPa (间隔 1.0MPa)。考虑螺旋管圈的二次流效应, 使用基于雷诺数 Re 或迪恩数 De 的函数关系式对黏度测量结果进行离心修正。在测量参数条件下, 气态环己烷的雷诺数 $Re \leq 1984.5$ 。研究表明: 双毛细管法测量环己烷液态和气态黏度时, 螺旋管圈的二次流效应具有显著差别; 液态环己烷的离心修正系数 $< 4.32\%$, 气态环己烷的离心修正系数最高达到 49%; 离心力二次流效应是影响环己烷气态黏度测量精度的最重要因素; 离心修正关系式的准确度对环己烷气态黏度测量结果的不确定度产生显著影响。

关键词: 双毛细管法; 气态黏度; 二次流效应; 测量精度; 再生冷却

中图分类号: TK123; V312+.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2021) 10-2358-09

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.200125

Viscosity Measurements for Gaseous Cyclohexane at High Temperature by Two-Capillary Method

CHEN Qiang, LIU Zhao-hui, BI Qin-cheng, CHENG Xiang, FENG Song

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to develop the application of two-capillary method on the viscosity measurement of gas hydrocarbon fuel at high temperature, the viscosities of gas cyclohexane were measured by the two-capillary viscometer at high temperature and subcritical conditions. The temperature ranged from 301.9K to 567.1K (about 10K intervals) and pressure ranged from 0.5MPa to 4.0MPa (1.0MPa intervals). Considering the secondary flow of fluid in the coils, the viscosity measurement results were modified by centrifugal correction coefficient as a function of Reynolds number (Re) or Dean number (De), and the Reynolds numbers (Re) of the gas cyclohexane were below 1984.5 in the measurements. The research indicated that the secondary flow effect in the coils differs significantly between the viscosity measurement of liquid and gas cyclohexane by two-capillary method. The centrifugal correction coefficients for viscosity measurements of liquid cyclohexane was less than 4.32%, for viscosity measurements of gas cyclohexane was up to 49%. Therefore, the second flow effect that results from centrifugal force is the most important factor affecting the measurement accuracy of the viscosity of gas cyclohexane, and the accuracy of the centrifugal correction function plays an important role on determining the uncertainties of measurement results of viscosity of gas cyclohexane.

* 收稿日期: 2020-03-12; 修订日期: 2020-05-14。

基金项目: 国家自然科学基金 (51776167)。

作者简介: 陈 强, 硕士生, 研究领域为流体黏度的实验测量。

通讯作者: 刘朝晖, 博士, 副教授, 研究领域为飞行器再生冷却、吸热型碳氢燃料。

引用格式: 陈 强, 刘朝晖, 毕勤成, 等. 双毛细管法高温气态环己烷黏度测量研究[J]. 推进技术, 2021, 42(10):2358-2366. (CHEN Qiang, LIU Zhao-hui, BI Qin-cheng, et al. Viscosity Measurements for Gaseous Cyclohexane at High Temperature by Two-Capillary Method[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(10):2358-2366.)

Key words: Two-capillary method; Vapour-phase viscosity; Secondary flow effects; Measurement precision; Regenerative cooling

1 引言

在新型高超声速飞行器中,再生冷却技术是很有前景的热防护方法^[1]。再生冷却系统运行时,碳氢燃料既是推进剂也是冷却剂。燃料流过布置在燃烧室壁面内的冷却通道,作为冷却剂带走多余的热量,然后喷入燃烧室燃烧^[2]。在冷却通道内,随着燃料温度升高,燃料的物性(动力黏度等)发生剧烈变化,表现为沿着冷却通道的方向,雷诺数不断变化。

再生冷却技术的发展使得获得高温碳氢燃料的热物性数据成为需要。碳氢燃料往往是组分复杂的混合物,由正构烷烃、异构烷烃、环烷烃和芳香烃等烃类化合物组成^[3]。除了实验测量外,获得碳氢燃料的物性还可以用替代模型来计算,有学者提出单组元、三组元、四组元和六组元等替代模型^[4]。环己烷分子具有简单、典型的环状结构,是一种实用的环烷烃代替分子。环己烷动力黏度(以下简称黏度)测量方法研究可起到以下作用:(1)为碳氢燃料黏度测量提供方法;(2)丰富环己烷黏度数据库;(3)为碳氢燃料热物性计算提供数据。

2014年,Tariq等^[5]总结了环己烷黏度测量的历史文献,共186篇文献含1427个数据点,用于发展环己烷黏度预测关联式。其中88.7%的文献只测量了大气压下、室温附近的液态环己烷黏度。测量温度最低为288K,最高为673K,测量压力最高到110MPa。这些数据主要分布在0.1~100MPa的液态区,气态区仅有Grachev等^[6](473~673K,0.1~60MPa)和Vogel等^[7](298~632K,0~0.3MPa)测量的两组数据。所有数据中,测量温度高于423K的仅有3组。本文采用双毛细管法对高温环己烷的黏度进行测量,测量压力从0.5~4MPa(接近临界压力),测量温度从301.9~567.1K(临界温度附近),测量范围内的相态既有液态也有气态,本文重点研究二次流效应对双毛细管法环己烷气态黏度测量的影响。

常温气体、高温液体的黏度测量,毛细管法的测量精度很高。2005年,Berg^[8]使用毛细管法测量了He、N₂和Ar等气体在常温下(298.15K)的黏度,和文献测量值偏差仅0.162%。近年来,Liu等^[9]将双毛细管法应用于碳氢燃料高温液态黏度测量。对于高温气体的黏度测量,毛细管法的应用也非常广泛,但测

量精度有所下降^[10-11]。文献[12-14]使用毛细管法得到了大量的过热水蒸汽黏度数据,使用的毛细管内径约0.2~0.5mm,长度约300~500mm,测量不确定度约3%~4%。

本文使用双毛细管法测量了高温气态环己烷的黏度,因碳氢燃料在高温下易发生裂解、产生结焦,因此使用1.6mm内径毛细管。由于内径增加,需要采用更长的毛细管来测量阻力,为了方便将测量试验段放置于加热炉中,将毛细管制成了螺旋管圈。螺旋管圈二次流效应对环己烷高温气态黏度测量的影响是本文的主要研究内容。

2 双毛细管法黏度测量原理

2.1 基本方程

在泊肃叶流动中,定常不可压缩牛顿流体在长直圆管内作无滑移层流,流体的质量流量 Q_m 和管内压力梯度 $\Delta p/L$ 关系为

$$Q_m = \frac{\pi D^4}{128 L} \frac{\Delta p}{\eta} \rho \quad (1)$$

式中 η 为流体黏度, ρ 为流体密度, L 为管长, D 为管内径。

定义毛细管结构系数 Z ,有如下关系

$$Q_m = Z \cdot \Delta p \frac{\rho}{\eta} \quad (2)$$

在双毛细管法中,两段毛细管串联,上游为对比段,下游为实验段。实验段维持恒温 T ,对比段维持恒温 T_0 。可得实验段与对比段内流体的黏度比 r_η 如式(3)所示^[9]。

$$r_\eta = \frac{\eta_{T,\rho_M}}{\eta_{T_0,\rho_R}} = \frac{\Delta p_{M,T} \rho_{T_0,\rho_R} Z_{M,T}}{\Delta p_{R,T_0} \rho_{T_0,\rho_M} Z_{R,T_0}} \quad (3)$$

式中下标M表示实验段,下标R表示对比段。

在常温常压下标定毛细管结构系数:实验段和对比段维持恒温 T_0 。可得双毛细管结构系数之比,如式(4)所示,下标cal表示标定实验。

$$\frac{Z_{M,T_0}}{Z_{R,T_0}} = \left(\frac{\Delta p_{R,T_0} \rho_{T_0,\rho_R} \eta_{T_0,\rho_M}}{\Delta p_{M,T_0} \rho_{T_0,\rho_M} \eta_{T_0,\rho_R}} \right)_{cal} \quad (4)$$

考虑高温测量时,热膨胀对高温毛细管结构系数的影响^[9],假设管材各向同性, α 为毛细管金属材料的线膨胀系数,则有

$$\frac{Z_{M,T}}{Z_{M,T_0}} = \left(\frac{L + \Delta L}{L} \right)^3 = (1 + \alpha \Delta T)^3 \quad (5)$$

式中 ΔT 为实验段测量时相对结构系数标定时的升温, $\Delta T = T - T_0$ 。用 r_ρ 表示式(3)中的密度比, 将式(4)、(5)代入式(3), 可得高、低温流体的黏度比为

$$r_\eta = r_\rho \frac{\Delta p_{M,T}}{\Delta p_{R,T_0}} \left(\frac{\Delta p_{R,T_0} \rho_{T_0,\rho_R} \eta_{T_0,\rho_M}}{\Delta p_{M,T_0} \rho_{T_0,\rho_M} \eta_{T_0,\rho_R}} \right) \cdot (1 + \alpha \Delta T)^3 \quad (6)$$

根据式(6), 已知流体密度和对比状态下流体的黏度, 可得到测量状态下流体的黏度。

2.2 离心修正

毛细管内径为 D , 螺旋管圈盘绕直径为 D_{curve} 。相同流量下, 螺旋管内压降必然大于直管内压降, 直毛细管的压降 Δp_s 乘以一个系数即可得到螺旋毛细管的压降 Δp_c , 即

$$\Delta p_c = f_{\text{cent}}(De) \Delta p_s \quad (7)$$

式中 f_{cent} 为二次流效应修正系数, 与迪恩数 De 有关。其中, $De = Re\delta^{0.5}$, 曲率 $\delta = D/D_{\text{curve}}$ 。

Dean^[15] 研究小曲率弯管时, 将弯管内流动 N-S 方程简化为 Dean 方程, 使用微扰法得到速度分布的近似解。在横截面上积分轴向速度得到体积流量, 之后在相同压力梯度下与直管内的体积流量比较^[16]。转换和计算后易知 $f_{\text{cent}}(De)$, 适用于 $De < 16.7$ ^[17]。

White^[18] 实验测量了曲率(内径/mm), 分别为 1/15(10.3), 1/50(6.3), 1/2050(3) 三种弯管的阻力, 在相同雷诺数下与直管内的阻力比较得到 $f_{\text{cent}} - Re$ 图, 拟合后得到 $f_{\text{cent}}(De)$ 。Hasson^[19] 将 White 的实验数据重新整理, 认为在 De 较大时 ($30 < De < 2000$), f_{cent} 和 $De^{0.5}$ 成正比, 即

$$f_{\text{cent}} = 0.0969De^{0.5} + 0.556 \quad (8)$$

Van Dyke^[17] 在 Dean 的基础上进一步求解, 结果显示当 De 较大时 ($De > 30$) 时 f_{cent} 与 $De^{0.25}$ 成正比, 如式(9)所示。这与 White 等的实验结果矛盾, 但是数值计算的结果^[20] 表明, 当 $De < 100$ 时, Van Dyke 的关系式仍足够精确。

$$f_{\text{cent}} = \left[1 + 16 \left(\frac{De}{40.58} \right)^4 \right]^{1/16} \quad (9)$$

本文选用 Van Dyke 公式 ($De < 100$) 和 Hasson 公式 ($30 < De < 2000$) 来分段确定 f_{cent} , 因两个公式有重合的部分, 选取分段点为 $De = 60$, 使曲线尽量平滑, 当 $De \leq 60$ 时使用式(9), 当 $De > 60$ 时使用式(8)。

在本文的实验中, 曲率 $\delta = 1/100$, 根据 Adler^[21] 的实验可知, 该曲率下弯管内的临界雷诺数向后推移至 4730, 由此得到分段 $f_{\text{cent}} - Re$ 关系, 如图 1 所示。测量参数在 $0 < Re < 100$ 时, 二次流效应带来的阻力增加

几乎可以忽略。

另外, 需要注意的是, 离心修正关系式中包含待测量黏度, 所以离心修正的过程采用迭代计算。

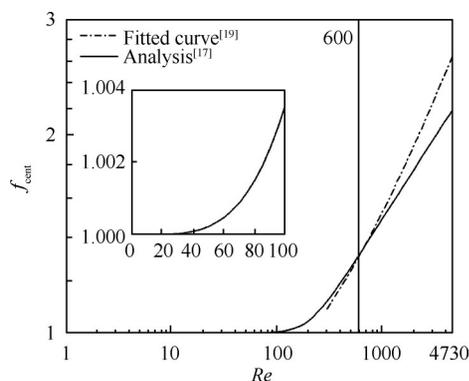


Fig. 1 Centrifugal correction f_{cent} as a function of Re

2.3 双毛细管的结构参数

设计毛细管黏度计时, 确定毛细管尺寸主要考虑以下两因素: (1) 合适的压降范围; (2) 黏度计内的流体须保证层流。

当流体的质量流量一定且毛细管的结构确定时, 毛细管内的压降与流体的运动黏度 (η/ρ) 成正比(文中出现的“黏度”均指动力黏度 η , 此处“运动黏度”指动力黏度和密度之比 η/ρ), 如式(10)所示。定压条件下随着温度的升高, 流体的运动黏度逐渐降低直到相变点达到最低, 气化点运动黏度突然增加, 气化后随温度升高而逐渐增加, 如图 2 所示为不同压力下水的运动黏度变化规律。由此可知, 定压(接近临界压力)条件下, 当流体为饱和液时, 该压降约为实验工况的最小压降, 必须满足压差表的分辨率。

$$\Delta p = \frac{\eta}{\rho} \frac{128L}{\pi D^4} Q_m = \frac{32L}{D^3} \frac{\eta^2}{\rho} Re \quad (10)$$

综上所述, 根据 Tariq 等^[5] 推荐的计算值, 环己烷

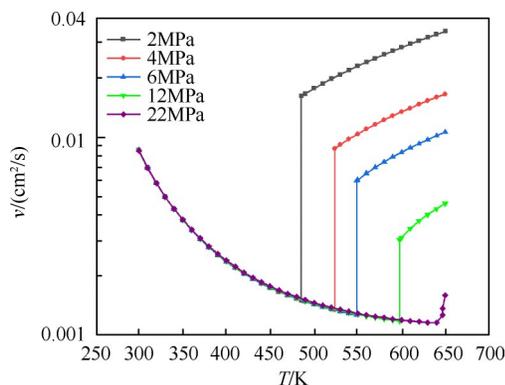


Fig. 2 Kinematic viscosity ν of water as a function of temperature T along isobars

在 542.15K 时,饱和压力为 3.53MPa。此时环己烷饱和液的黏度为 $61.19\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$,密度为 $413.74\text{kg}/\text{m}^3$,可以认为是测量工况内的压降最小点。同时调节流量使得 $Re \leq 100$ 。若要此时毛细管内的压降易于测量且不被零点漂移干扰,采用 Rosemount 压差表(量程 0.7kPa)进行压差测量,该压降至少要 $>0.02\text{kPa}$,则毛细管的结构必须满足

$$\frac{L}{D^3} = \frac{\rho}{\eta^2} \frac{\Delta p}{32Re} > 1.73 \times 10^9 \quad (11)$$

当毛细管内径为 1.6mm,可得毛细管长度至少需 2.83m,取整为 3m。另外,从以上计算中也可以看出,流体气化后,雷诺数会剧增。流量一定且已经很小的情况下,此时想要使毛细管内的 $Re < 100$ 非常困难。

3 实验装置与实验方法

3.1 实验样品

实验样品为环己烷,CAS 登录号 110-82-7,样品来源为阿拉丁,纯度 $\geq 95.5\%$ (质量分数)。Zhou 等^[22]给出:环己烷的三相点温度为 279.86K,三相点压力为 5.3487kPa;临界温度为 $553.6 \pm 0.3\text{K}$,临界压力为 $4.0805 \pm 0.04\text{MPa}$ 。

3.2 实验系统

实验系统示意图如图 3 所示。实验系统包括恒流柱塞泵(0~9.9ml/min)、水浴恒温槽、空气浴恒温槽、上下游毛细管、压力压差和温度测量装置、过滤器和背压阀等。

双毛细管黏度测量试验段主要包括对比段和实验段两个毛细管螺旋盘管。对比段和实验段毛细管均采用 316 不锈钢管。对比段毛细管内径 $250\mu\text{m}$,盘绕直径为 57.5mm,长 1.220m;实验段内径 1.6mm,盘绕直径为 160mm,长 3.000m。上游对比段毛细管通过水浴(去离子水)维持恒温;下游实验段毛细管通过空气浴维持恒温。实验段毛细管前布置预热盘管,将测量工质加热到测量温度。

3.3 测量仪表及其不确定度

采用 Rosemount 3051CD 压差表测量对比段压差 $\Delta p_{R,T_0}$ 和实验段压降 $\Delta p_{M,T}$,采用瑞士 Huba 公司的压力表测量对比段出口压力 p_R 和实验段入口压力 p_M ,采用 Omega 标配 K 型铠装热电偶分别测量水浴温度 T_0 、实验段进口温度 T_{in} 和出口温度 T_{out} 。

测量仪表的参考精度和测量值的标准不确定度见表 1。其中 Omega 出厂的 K 型铠装热电偶的误差范围为 2.2°C 或 0.75% ,以较大者为准。取 $k=2$,按正态分布求得标准不确定度为 1.1°C 或 $0.375\%N_{\text{reading}}$,其

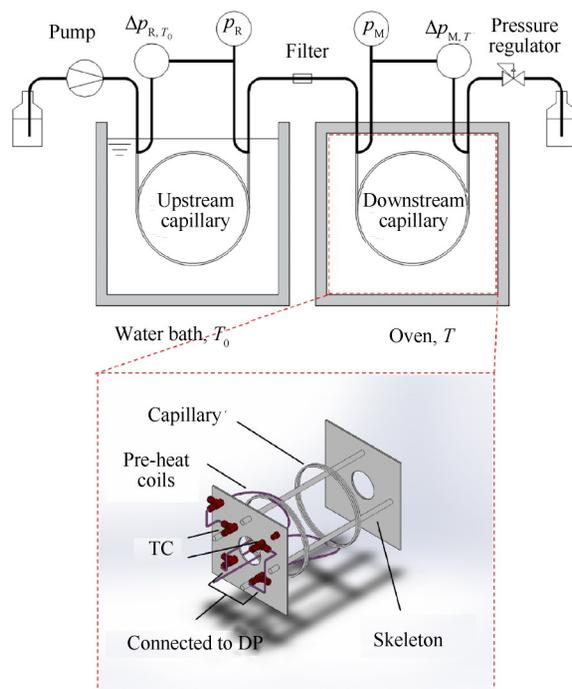


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

中 N_{reading} 表示读数。

3.4 实验步骤

首先标定双毛细管的结构系数。将上、下游毛细管在恒温容器中保持恒温,约 298K。环己烷在室温下以 1ml/min 的恒定体积流量流进入双毛细管系统。测量两段毛细管的压降,重复多次实验取平均值,代入式(4)得到结构系数之比。标定结束后,上游毛细管恒温为约 298.5K,将下游毛细管升温并维持在测量温度,调节系统压力后测量两段毛细管的压降。将压降测量值代入式(6),可得上、下游毛细管的高、低温流体黏度比,已知参考黏度和密度比可得高温黏度。最后,考虑二次流效应,应用公式(7)、(8)和(9),对黏度测量值进行修正,得到修正后的黏度测量结果。

4 结果与讨论

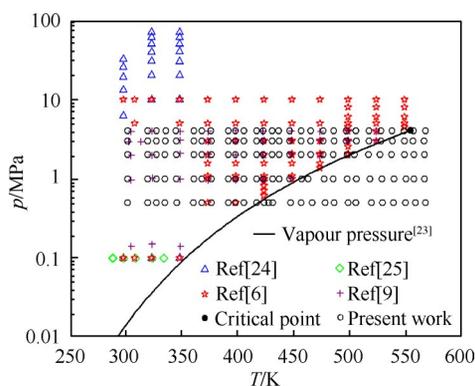
4.1 环己烷的黏度测量结果

环己烷黏度测量参数范围:压力为 0.5~4.0MPa,温度为 301.9~567.1K。测量数据点分布如图 4 所示。在测量参数范围内,流体处于液态和气态,以气液饱和和线为界分布在两侧。由图 4 知,文献[6,9,23-25]中对环己烷的黏度测量主要集中在液态区。

为了得到环己烷在温度 T 和压力 p_M 下的黏度,需要环己烷在温度 T_0 和压力 p_R 下的参考黏度数据。本文从文献中选取了 12 个黏度数据来建立在 T_0 和 p_R 附近的局部黏度关联式(12),选取数据时考虑了它们

Table 1 Accuracy of transmitters and type B evaluation of standard uncertainty u

Transmitter	Range	Accuracy	Measurement result	u
K type Thermocouple	-200~1250°C	2.2°C or 0.75% N_{reading}	$T_0, T_{\text{in}}, T_{\text{out}}$	1.1°C or 0.375% N_{reading}
Pressure transmitter①	0~25MPa	0.3%	p_R	0.038MPa
Pressure transmitter②	0~16MPa	0.3%	p_M	0.024MPa
Differential pressure transmitter①	0~248kPa	0.04%	$\Delta p_{R, T_0}$	0.05kPa
Differential pressure transmitter②	0~745Pa	0.1%	$\Delta p_{M, T}$	0.4Pa

**Fig. 4 Distribution of viscosity data η of cyclohexane at temperatures T and pressures p**

的测量范围和测量不确定度^[6,24-26],如表2所示。这些黏度数据的温度处于288.69~308.15K,压力小于10MPa,不确定度 $\leq 2\%$ 。

拟合局部黏度关联式时采取了如下的形式^[27],各物理量的单位与表2相同。

$$\ln \eta = a + bT + cp \quad (12)$$

式(12)中的参数见表3,关联式的相对偏差的绝对值平均(AAD)为0.3%,最大值(MAD)为0.66%。

Table 2 Literature viscosity data η of cyclohexane at temperatures T and pressures p together with relative uncertainties $u_r(\eta)$

Reference	T/K	p/MPa	$\eta/(\mu Pa \cdot s)$	$u_r(\eta)/\%$
[26]	298.15	0.1	896.1	2.0
[25]	288.69	0.1	1056.8	0.3
	298.23	0.1	893.8	
	298.41	0.1	889.4	
	308.99	0.1	749.4	
[24]	298.15	0.1	891.8	2.0
	298.15	6.2	970.2	
	298.15	0.1	894.2	
[6]	298.15	10.0	1022.3	-
	308.15	0.1	753.8	
	308.15	5.0	808.4	
	308.15	10.0	855.1	

Table 3 Parameters in equation (12)

a	b	c	AAD/%	MAD/%
11.9105	0.01715	0.01311	0.3	0.66

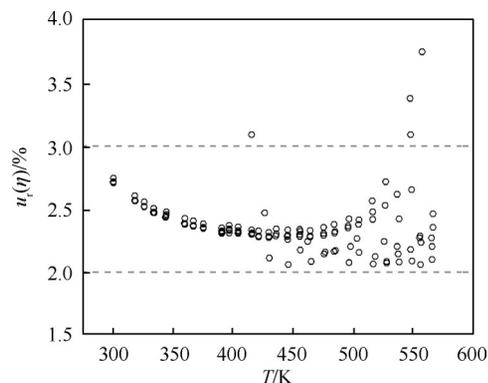
计算所需的密度比 r_p 来自美国国家标准局(NIST)的REFPROP软件(版本10.0)。由软件说明可知,温度 $<500K$ 时,密度的不确定度为0.1%,温度大于 $500K$ 时,为0.2%。

表4给出了环己烷的黏度测量结果,共获得了140个黏度数据。测量温度 T 取实验段入口和出口温度的平均值,测量压力取实验段入口压力 p_M 。

4.2 结果分析

4.2.1 测量结果的不确定度分析

不考虑离心修正公式误差的情况下,由测量过程的不确定度和读数过程的标准差计算可得,环己烷黏度测量结果的标准不确定度一般为2%~3%,最大为3.8%。表4中的每个环己烷黏度测点的相对标准不确定度如图5所示,其中,大部分气态黏度的相对标准不确定度约2%~2.5%,大部分液态黏度的相对标准不确定度约2.5%~3%。液态黏度不确定度大

**Fig. 5 Estimated standard relative uncertainties $u_r(\eta)$ of individual viscosity measurements η as a function of temperature T**

于气态黏度不确定度的原因是液态低温黏度对温度变化更敏感,此时热电偶误差引起的温度测量不确定度会导致较大的黏度测量不确定度。

不确定度的传递公式如式(13)所示。第1个

Table 4 Experimental viscosity ratios r_η and derived viscosities η of cyclohexane*

T/K	r_ρ	r_η	$\eta_{T,p_M}^{mea}/(\mu Pa \cdot s)$	T/K	r_ρ	r_η	$\eta_{T,p_M}^{mea}/(\mu Pa \cdot s)$	T/K	r_ρ	r_η	$\eta_{T,p_M}^{mea}/(\mu Pa \cdot s)$
$p_M=0.5MPa$				485.0	0.0327	0.0092	8.27	405.6	0.8628	0.2783	258.2
302.0	0.9957	0.9407	842.6	497.4	0.0322	0.0097	8.73	416.7	0.8468	0.2544	236.0
319.8	0.9737	0.7075	634.5	505.5	0.0317	0.0108	9.76	422.5	0.8384	0.2464	228.6
327.4	0.9641	0.6353	569.7	517.4	0.0295	0.0110	9.93	430.6	0.8261	0.2335	216.7
335.1	0.9544	0.5774	517.9	528.3	0.0305	0.0122	11.02	436.6	0.8169	0.2182	202.4
345.7	0.9408	0.5031	451.1	538.8	0.0288	0.0128	11.55	446.2	0.8015	0.2030	188.1
360.7	0.9211	0.4287	384.3	549.7	0.0268	0.0129	11.65	456.4	0.7846	0.1883	174.5
368.2	0.9111	0.3953	354.4	556.7	0.0268	0.0129	11.64	465.0	0.7695	0.1787	165.7
376.5	0.8998	0.3634	325.8	566.2	0.0268	0.0132	11.93	476.1	0.7483	0.1644	152.4
391.7	0.8785	0.3144	282.2	$p_M=2.0MPa$				485.8	0.7289	0.1533	142.0
398.1	0.8693	0.2923	262.4	302.0	0.9958	0.9400	859.4	496.4	0.7050	0.1393	129.1
405.5	0.8584	0.2762	247.9	319.8	0.9740	0.7081	647.7	505.6	0.6820	0.1305	121.0
416.6	0.0170	0.0013	1.14	327.6	0.9643	0.6321	578.0	516.9	0.6482	0.1200	111.3
423.5	0.0165	0.0085	7.63	335.3	0.9548	0.5771	527.7	527.5	0.6072	0.1039	96.4
427.5	0.0162	0.0033	2.96	345.5	0.9418	0.5046	461.4	537.8	0.1194	0.0671	62.1
430.9	0.0165	0.0057	5.14	361.0	0.9220	0.4299	393.3	548.4	0.1122	0.1084	100.4
446.9	0.0158	0.0073	6.56	368.2	0.9125	0.3962	362.4	555.8	0.0997	0.0181	16.74
456.6	0.0151	0.0081	7.23	376.4	0.9016	0.3661	334.9	565.9	0.1000	0.0318	29.47
466.1	0.0148	0.0085	7.65	391.8	0.8806	0.3214	294.3	$p_M=4.0MPa$			
477.7	0.0151	0.0089	8.00	398.0	0.8718	0.2924	267.8	302.0	0.9959	0.9397	881.5
486.1	0.0139	0.0097	8.68	405.6	0.8611	0.2772	253.8	319.8	0.9745	0.7065	663.6
498.5	0.0135	0.0105	9.40	416.6	0.8449	0.2546	233.1	327.6	0.9650	0.6334	594.2
505.1	0.0128	0.0106	9.47	422.5	0.8362	0.2468	226.0	335.9	0.9549	0.5693	534.4
519.0	0.0131	0.0105	9.42	430.7	0.8234	0.2327	213.1	345.1	0.9435	0.5096	478.6
528.5	0.0129	0.0102	9.16	436.7	0.8140	0.2179	199.5	361.1	0.9233	0.4279	401.5
538.7	0.0126	0.0104	9.36	446.2	0.7982	0.2021	184.8	368.2	0.9143	0.3957	371.5
549.1	0.0120	0.0108	9.67	456.5	0.7804	0.1863	170.4	376.3	0.9038	0.3679	345.2
558.0	0.0118	0.0114	10.25	465.0	0.7648	0.1771	162.1	392.0	0.8830	0.3193	300.0
566.9	0.0112	0.0114	10.21	476.3	0.7425	0.1633	149.5	398.0	0.8749	0.3010	283.0
$p_M=1.0MPa$				485.1	0.7231	0.1522	139.2	405.6	0.8645	0.2783	261.4
302.0	0.9957	0.9417	850.0	497.3	0.6930	0.1403	128.5	416.9	0.8485	0.2546	239.2
319.8	0.9737	0.7066	638.0	503.9	0.0748	0.0998	91.3	422.5	0.8405	0.2468	231.8
327.5	0.9642	0.6357	574.2	516.3	0.0724	0.0082	7.55	430.6	0.8286	0.2349	220.7
335.1	0.9546	0.5772	521.5	526.4	0.0659	0.0096	8.79	436.4	0.8196	0.2196	206.0
345.5	0.9413	0.5053	456.4	537.0	0.0654	0.0109	9.95	446.4	0.8043	0.2115	198.5
360.9	0.9213	0.4291	387.4	548.4	0.0631	0.0120	10.99	456.3	0.7883	0.1898	178.1
368.2	0.9116	0.3958	357.6	556.9	0.0603	0.0133	12.20	465.0	0.7734	0.1797	168.6
376.4	0.9005	0.3654	330.1	566.1	0.0577	0.0129	11.84	476.1	0.7536	0.1659	155.7
391.6	0.8794	0.3176	287.3	$p_M=3.0MPa$				485.3	0.7358	0.1557	146.1
398.0	0.8704	0.2918	263.9	302.0	0.9958	0.9392	869.7	496.5	0.7130	0.1412	132.6
405.5	0.8594	0.2761	249.5	319.8	0.9742	0.7068	654.8	505.2	0.6927	0.1332	124.9
416.5	0.8430	0.2530	228.7	327.7	0.9646	0.6319	585.9	516.6	0.6640	0.1223	114.8
422.5	0.8338	0.2453	221.8	335.6	0.9548	0.5750	532.6	527.3	0.6305	0.1077	101.1
430.9	0.8204	0.2317	209.4	345.4	0.9425	0.5073	470.4	537.0	0.5906	0.1071	100.4
436.9	0.8105	0.2180	196.9	361.1	0.9226	0.4292	397.7	547.8	0.5288	0.0922	86.6
446.3	0.7947	0.2005	181.2	368.2	0.9134	0.3955	366.6	556.2	0.2071	0.0544	51.0
456.7	0.7759	0.1841	166.3	376.4	0.9026	0.3667	339.8	567.1	0.1676	0.0292	27.41
462.8	0.0352	0.0116	10.46	391.8	0.8819	0.3236	300.3				
476.8	0.0346	0.0070	6.37	398.0	0.8734	0.2965	275.2				

*The temperature of upstream capillary was set to $T_0=298.5K$, and downstream capillary was set to desired $T \pm 2.2K$. The pressure of downstream capillary was set to desired $p_M \pm 0.05MPa$.

和第2个中括号表示测量和标定时压差测量带来的不确定度,第3个中括号表示热膨胀修正时温差测量带来的不确定度,第4个和第5个中括号表示测量和标定时引用数据带来的不确定度,第6个和第7个中括号表示温度和压力测量带来的不确定度。

$$\begin{aligned}
 u_r^2(\eta_{T,p_M}) = & \left[u_r^2(\Delta p_{M,T}) + u_r^2(\Delta p_{R,T_0}) \right] + \\
 & \left[u_r^2(\Delta p_{M,T_0}) + u_r^2(\Delta p_{R,T_0}) \right]_{\text{cal}} + \\
 & 3 \left[\alpha \cdot u(\Delta T) / (1 + \alpha \Delta T) \right]^2 + \\
 & \left[u_r^2(\rho_{T_0,p_M} / \rho_{T_0,p_R}) + u_r^2(\eta_{T_0,p_R}) \right] + \\
 & \left[u_r^2(\rho_{T_0,p_R} / \rho_{T_0,p_M}) + u_r^2(\eta_{T_0,p_M} / \eta_{T_0,p_R}) \right]_{\text{cal}} + \\
 & \left[\eta_{T,p_M}^{-1} (\partial \eta_{T,p_M} / \partial T) u(T) \right]^2 + \\
 & \left[\eta_{T,p_M}^{-1} (\partial \eta_{T,p_M} / \partial p_M) u(p_M) \right]^2
 \end{aligned} \quad (13)$$

4.2.2 离心修正对测量结果的影响

测量的过程中需要考虑的效应包括热膨胀和二次流等,其中二次流对测量结果的影响最大,修正因子 f_{cent} 如图6所示。图7表明,测量值在考虑二次流效应(进行离心修正)前、后的黏度值变化显著。图8和图9分别为离心修正前后环己烷黏度的修正量 $\eta_{\text{after}} - \eta_{\text{before}}$ 和相对修正量 $(\eta_{\text{after}} - \eta_{\text{before}}) / \eta_{\text{before}}$ 。

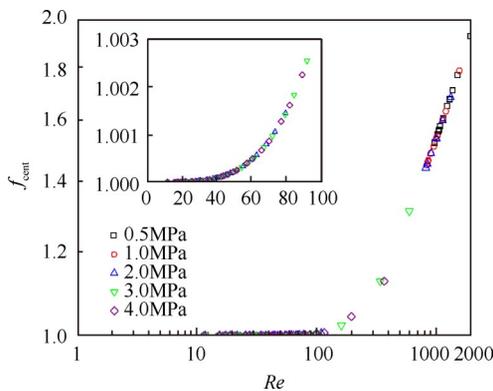
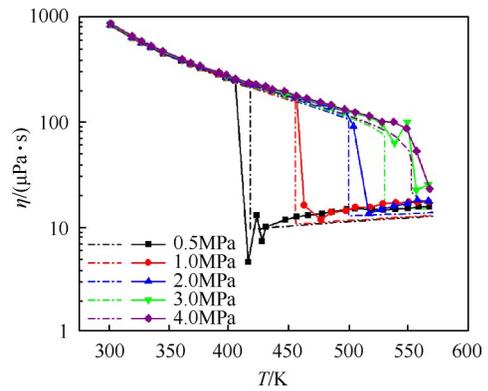
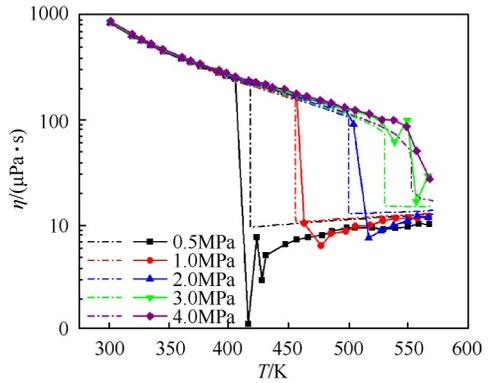


Fig. 6 Centrifugal correction f_{cent} as a function of Re

从图7,8和9中看出:(1)环己烷发生相变从液态变成气态,黏度值发生突变迅速降低。从黏度值突变的趋势上可以大概判定相变点的位置。(2)液态下的二次流效应不显著,对黏度测量值的修正较小;而气态下的二次流效应对黏度测量值产生显著影响。校核管路内的 De 和 Re 可知,流体处于液态时实验段内 $Re \leq 117.7$,流体处于气态时实验段内 $Re \leq 1984.5$ 。(3)流体处于液态时,离心修正前后黏度的修



(a) Before centrifugal correction



(b) After centrifugal correction

Fig. 7 Viscosity η of cyclohexane as functions of temperatures T along isobars

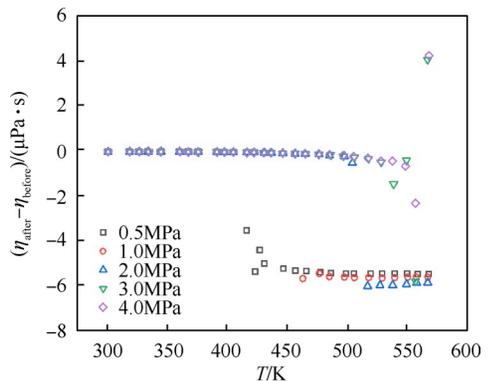


Fig. 8 Differences $\eta_{\text{after}} - \eta_{\text{before}}$ of the viscosities of cyclohexane result from centrifugal correction

正量最大为 $-2.3 \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$,相对修正量 $< 4.32\%$ 。(4)流体处于气态时,离心修正前后黏度的修正量最大为 $-5.98 \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$,相对修正量 $< 49\%$ 。

因此可以看出,对运动黏度小的流体来说,为了观测到最小压降,使得毛细管长度大幅增加,盘绕后引入接近49%的相对修正量,远远大于测量过程中的4%~6%的测量不确定度($k=2$)。此时,离心修正的误差成为测量精度最重要的影响因素。

4.2.3 环己烷的黏度

将本文黏度测量值与流体物性查询软件 REF-

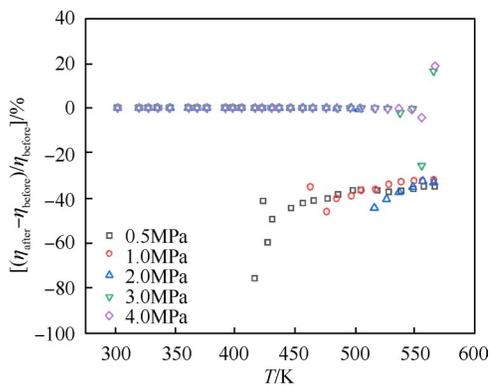


Fig. 9 Deviations $(\eta_{after}-\eta_{before})/\eta_{before}$ of viscosities of cyclohexane after centrifugal correction from those before centrifugal correction

PROP(版本 10.0)预测值对比,图 10(a)和图 10(b)分别为液态和气态环己烷的测量黏度相对于 REFPROP 预测黏度的相对偏差。

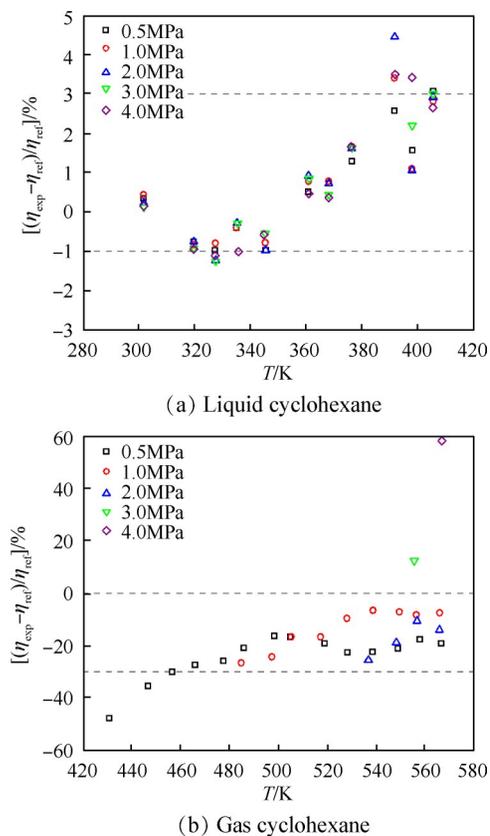


Fig. 10 Deviations $(\eta_{exp}-\eta_{ref})/\eta_{ref}$ of experimental viscosities from those predicted by REFPROP

从图中可知:(1)当温度低于 423K 时,本文的测量结果与 REFPROP 预测值一致,平均相对偏差 1.4%,最大相对偏差 5%。(2)本文使用的实验装置在液态区测量准确,结果可靠。(3)当温度高于 423K 时,对于气态环己烷,本文的测量结果比 REFPROP 预测

值小,平均相对偏差 20.9%,最大相对偏差 58%。

气态环己烷的黏度之所以小于预测值,是离心修正的结果。根据测量原理,盘绕弯管导致阻力增加,因此测得的流体黏度必然偏大,经过离心修正可得直管阻力和真实黏度。如图 7(a)和(b),修正前相对预测值偏大,修正后相对预测值偏小。

测量结果与 REFPROP 预测值的偏差有两个原因:(1)REFPROP 预测关系式所依据的数据库本身缺乏高温气态数据,其预测值本身存在偏差。(2)在测量过程中,离心修正公式存在不确定度。实验结果表明:离心修正对气态环己烷的黏度测量结果影响较大。所以,作者接下来的工作将致力于验证该公式的误差并改进测量方法,使其适合碳氢燃料各个相态的黏度测量。

5 结论

采用双毛细管法测量了亚临界压力环己烷的高温液态和气态黏度,得到以下结论:

(1)双毛细管法得到的环己烷液态黏度测量结果与 NIST 关联式数据吻合良好,平均偏差 1.4%;气态黏度测量结果与 NIST 关联式的平均偏差 20.9%。

(2)气态黏度测量结果偏差较大的原因主要有两点:其一 NIST 使用的关联式本身拟合时缺乏有效的气态实验数据,导致该关联式的环己烷气态黏度误差较大;其二是本文采用的双毛细管法在测量时的不确定度受到二次流效应的显著影响。

(3)双毛细管法测量环己烷液态和气态黏度时,螺旋管圈引入的离心修正系数值差别较大。流体处于液态时实验段内 $Re \leq 117.7$,相对修正量 $< 4.32\%$ 。流体处于气态时实验段内 $Re \leq 1984.5$,相对修正量小于 49%。

对于运动黏度较小的流体,比如碳氢燃料,必须将毛细管盘绕起来,此时测量的精度(气态)取决于离心修正关系式的准确程度。所以,作者之后的研究将致力于改进测量方法和进一步确定离心修正关系式。

致谢:感谢国家自然科学基金的资助。

参考文献

[1] 刘世俭,刘兴洲. 超燃冲压发动机可贮存碳氢燃料再生主动冷却换热过程分析[J]. 飞航导弹, 2009(3): 48-52.
 [2] Yan J, Liu S, Guo P, et al. Experimental Investigation on Convection Heat Transfer of Supercritical Hydrocar-

- bon Fuel in a Long Mini Tube[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020, 115(11).
- [3] 李海静, 刘国柱, 张香文. 全二维气相色谱-质谱分析煤油基吸热型碳氢燃料烃族组成[J]. *色谱*, 2018(8): 780-785.
- [4] Xu K K, Meng H. Analyses of Surrogate Models for Calculating Thermophysical Properties of Aviation Kerosene RP-3 at Supercritical Pressures[J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(3): 510-518.
- [5] Tariq U, Jusoh A R B, Riesco N, et al. Reference Correlation of the Viscosity of Cyclohexane from the Triple Point to 700K and up to 110MPa[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2014, 43(3).
- [6] Grachev V, Keramidin A, and Grigorev B. Experimental Investigation of Viscosity of Cyclohexane[J]. *Ministerstvo Vysshego Obrazovaniia SSSR*, 1989, 12: 61-66.
- [7] Vogel E, Holdt B, Strehlow T. The Initial Density Dependence of the Viscosity of Organic Vapours: Cyclohexane and Neopentane[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 1988, 148(1-2): 46-60.
- [8] Berg R F. Simple Flow Meter and Viscometer of High Accuracy for Gases[J]. *Metrologia*, 2005, 42(1).
- [9] Liu Z, Trusler J P M, Bi Q. Viscosities of Liquid Cyclohexane and Decane at Temperatures Between (303 and 598) K and Pressures up to 4 MPa Measured in a Dual-Capillary Viscometer[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2015, 60(8): 2363-2370.
- [10] Feng S, Liu Z, Bi Q, et al. Viscosity Measurement of *n*-Dodecane at Temperatures Between 303K and 693K and Pressures up to 10 MPa[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2018, 63(3): 671-678.
- [11] Yang Z, Liu Z, Bi Q, et al. Viscosity Measurements of Hydrocarbon Fuel at Temperatures from (303.2 to 513.2)K and Pressures up to 5.1MPa Using a Two-Capillary Viscometer[J]. *Thermochimica Acta*, 2015, 617: 1-7.
- [12] Whitelaw J H. Viscosity of Steam at Supercritical Pressures [J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1960, 2(4): 288-297.
- [13] Mayinger F. Messungen der Viskosität von Wasser und Wasserdampf bis ZU 700°C und 800 AT[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1962, 5(9): 807-824.
- [14] Nagashima A, Tanishita I. Viscosity Measurement of Water and Steam at High Temperatures and High Pressures [J]. *Bulletin of JSME*, 1969, 12(54): 1467-1478.
- [15] Dean W R. Note on the Motion of Fluid in a Curved Pipe [J]. *Philosophical Magazine*, 1927, 4(20): 208-223.
- [16] Dean W R. The Streamline Motion of Fluid in a Curved Pipe[J]. *Philosophical Magazine*, 1928, 5(30): 673-695.
- [17] Van Dyke M. Extended Stokes Series: Laminar Flow Through a Loosely Coiled Pipe[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1978, 86(1): 129-145.
- [18] White C M. Streamline Flow Through Curved Pipes[J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1929, 123(792): 645-663.
- [19] Hasson D. Streamline Flow Resistance in Coils[J]. *Reservoir Correspondence*, 1955, (1).
- [20] Jayanti S, Hewitt G F. On the Paradox Concerning Friction Factor Ratio in Laminar Flow in Coils[J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1991, 432: 291-299.
- [21] Adler M. Strömung in Gekrümmten Röhren[J]. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1934, 14(5): 257-275.
- [22] Zhou Y, Liu J, Penoncello S G, et al. An Equation of State for the Thermodynamic Properties of Cyclohexane [J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2014, 43(4).
- [23] Ewing M B, Ochoa J C S. The Vapour Pressure of Cyclohexane over the Whole Fluid Range Determined Using Comparative Ebulliometry[J]. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 2000, 32(9): 1157-1167.
- [24] Tanaka Y, Hosokawa H, Kubota H, et al. Viscosity and Density of Binary Mixtures of Cyclohexane with *n*-Octane, *n*-Dodecane, and *n*-Hexadecane under High Pressures[J]. *International Journal of Thermophysics*, 1991, 12(2): 245-264.
- [25] Knapstad B, Skjoelvik Per A, Oeye Harald A. Viscosity of Pure Hydrocarbons[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 1989, 34(1): 37-43.
- [26] Isdale J D, Dymond J H, Brawn T A. Viscosity and Density of *n*-Hexane-Cyclohexane Mixtures Between 25 and 100°C up to 500MPa[J]. *High Temperatures-High Pressures*, 1979, 11(5).
- [27] Sanchez-Vicente Y, Emerson I, Glover R, et al. Viscosities of Liquid Hexadecane at Temperatures Between 323K and 673K and Pressures up to 4MPa Measured Using a Dual-Capillary Viscometer[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2019, 64(2): 706-712.

(编辑:史亚红)